

トラップされた浮氷盤群に作用する流体力に関する実験的研究 The Experimental Study on The Fluid Resistance of Trapped Ice Floes

蒔田俊輔*河合孝治*佐伯浩**原文宏***

Shunsuke Makita, Takaharu Kawai, Hiroshi Saeki, Humihiro Hara

Abstract: The Okhotsk Sea of Hokkaido is covered with drift ice in winter. Drift ice that rushes into Saroma Lagoon cause heavy damage to scallops and oysters, and aquacultural facilities. So, an ice boom that prevents drift ice from rushing into the lagoon, especially one with a net at the center of lagoon mouth to completely shut out the drift ice, started being constructed in 1994, and 80 % is now completed. The ice force acting on this ice boom is determined by fluid force and is closely related to the shape of the ice underside. This paper reports on the results we obtained from model experiments on the fluid force of water acting on ice floe and a rubble field of ice.

Keywords: ice boom, fluid force, shape of ice underside, rubble field of ice

1.はじめに

北海道のオホーツク海に面するサロマ湖は、第1湖口と第2湖口により外海に通じており、湖内は、比較的深度、外海と同等の塩分濃度、高い静穏性を有し、帆立貝、牡蠣貝の養殖等、天然の栽培漁業の場として広く利用されている。しかし、オホーツク海沿岸には、通常1月から2月にかけて流氷が到来し、2つの湖口から侵入した流氷は、養殖施設等に多大な被害を与える。昭和49年には、総額約22億円にも昇る被害が発生した。

このような被害を防止するため、平成6年より、第1湖口部に全長1,430m、14基の固定構造物とその間に設置される13スパンの海水制御用アイスブームにより構成されるサロマ湖漁港防水堤の建設が開始され、現在ほぼ完成している。アイスブームには流れ、風による流体力により氷力が作用する。流体力は、氷盤下面の凹凸の状態により変化する。実際、アイスブームにトラップされた氷盤は流速がある条件を満たすと、回転し、メインワイヤーの下に取り付けられたネットに張り付く事、トラップされた大氷盤の下面にアイスジャムを形成する事等により、アイスブームに作用する氷力を著しく増加させる。

本研究では、種々の条件下における氷盤及び氷盤群に作用する流体力について実験的に検討を行った。

2.氷盤に作用する流体力

氷盤に作用する外力は、重力、浮力、揚力、形状抵抗力、剪断力であり、構造物に水平方向氷力として作用する外力は、図-1に示される剪断力と形状抵抗力の流体力である。 F_{SA} は風による剪断力、 F_{DA} は風による形状抵抗力、 F_{DW} は流による剪断力、 F_{SW} は流れによる形状抵抗力である。

氷盤に作用する単位幅当たりの流体力は、次式により表される。

$$F = F_A + F_W = (F_{SA} + F_{DA}) + (F_{SW} + F_{DW})$$

$$F_{SA} = \frac{1}{2} \rho_A C_{SA} U_{10}^2 L, \quad F_{DA} = \frac{1}{2} \rho_A C_{DA} U_{10}^2 (0.1H)$$

$$F_{SW} = \frac{1}{2} \rho_W C_{SW} V^2 L, \quad F_{DW} = \frac{1}{2} \rho_W C_{DW} V^2 (0.9H)$$

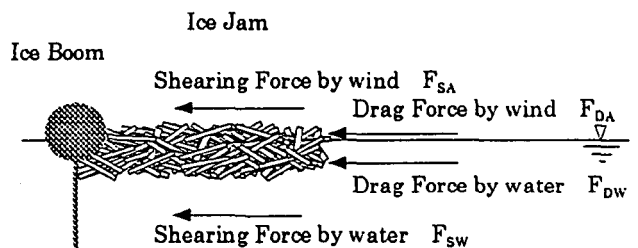


図-1 氷盤に作用する流体

F_{SA} : 風による剪断力、 F_{DA} : 風による形状抵抗力、
 F_{SW} : 流れによるせん断力、 F_{DW} : 流れによる形状抵抗力、
 C_{SA} : 氷盤と空気の剪断力係数、
 C_{DA} : 空気による形状抵抗係数、
 C_{SW} : 氷盤と流れのせん断力係数、
 C_{DW} : 流れによる形状抵抗係数、
 ρ_A : 空気の密度、 ρ_W : 流体の密度、
 L : 氷盤の影響長、 H : 氷厚、 U_{10} : 高さ10mでの風速、

空気の密度は水の密度に比べ非常に小さい事を考慮すると、流体力を算定する際には、流れによる剪断力、形状抵抗力が重要となる。

* 学生会員 北海道大学大学院

** 正会員 北海道大学大学院

*** (社)北海道開発技術センター

3. 流体力に関する既存研究

氷盤の流体力に関する既存研究の成果を、表－1 に示す。

表－1

1) 現地測定

	研究者	抵抗係数	備考
C_{SA}	田畑等	0.92×10^{-3} 、 1.06×10^{-3} ($V_{10}=5(\text{m/sec})$)	氷盤に作用する剪断力を直接測定
	Allison	$0.82 \times 10^{-3} \sim 2.02 \times 10^{-3}$ ($V_{10}=6.7 \sim 12.5(\text{m/sec})$)	南極の Mawson 基地近くの氷盤で測定
	Leavitt	2.7×10^{-3}	北極海の海上で測定
	青田等	4.0×10^{-3} ($V_{10}=10(\text{m/sec})$)	オホーツク海での実測結果
C_{SW}	Mcpee	1.1×10^{-2}	夏季北極海の氷盤の運動を観察

2) 室内実験

	研究者	抵抗係数	備考
C_{SA}	上田等	2.0×10^{-3} ($V_{10}=1.7 \sim 13(\text{m/sec})$)	風洞実験
C_{DA}	上田等	2.45	風洞実験
C_{SW}	上田等	$7.0 \times 10^{-3} \sim 7.5 \times 10^{-3}$	平坦な氷盤 (パラフィン盤)
		2.6×10^{-2}	凹凸の有る氷盤 (矩形凹凸)
	国松等	7.0×10^{-3}	平坦な氷盤群 (ポリプロピレン盤)
		2.1×10^{-2}	3 種類の氷厚を混合させた氷盤群
		$1.0 \times 10^{-1} \sim 2.5 \times 10^{-1}$	アイスジャム状態
C_{DW}	上田等	5.3×10^{-1} 、 6.5×10^{-1}	矩形断面 (パラフィン盤)

上田等は、凹凸のある氷盤の流体抵抗に関する実験(1992)を行い、平坦な氷盤、下面に矩形状の凹凸の有る模型氷盤を用い、流体力が凸部の高さ k とその間隔 S の比 $S/k=7.5$ に於いて最大になることを明らかにし、平坦な氷盤については $C_{SW}=7.0 \times 10^{-3} \sim 7.5 \times 10^{-3}$ 、凹凸の有る氷盤については $C_{SW}=2.6 \times 10^{-2}$ 、 $C_{DW}=6.2 \times 10^{-1}$ を求めた。また、この時のレイノルズ数の範囲は、 $Re=(kV/\nu)=1,000 \sim 3,500$ である。

国松等は、アイスブームに作用する流体力に関する実験(1992)を行い、アイスジャム状態に於いて、アイスブームに作用する張力から流体力を剪断力のみで表し、 $C_{SW}=1.0 \times 10^{-1} \sim 2.5 \times 10^{-1}$ を求めた。また、この時のレイノルズ数の範囲は、 $Re=(LV/\nu)=7,000 \sim 15,000$ である。

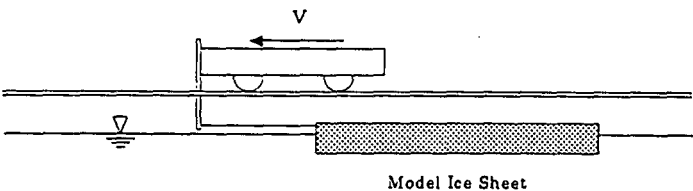
4. 流体力の凹凸形状効果に関する実験

上田等は、凹凸を付けた模型氷盤に作用する流体力を測定し、剪断力係数を求めたが、凹凸形状は矩形のみであった。しかし、実際の氷盤に於ける下面形状は複雑である。今回は、模型氷盤下面の凹凸形状を変化させ、流体力に関する凹凸形状効果について実験する。

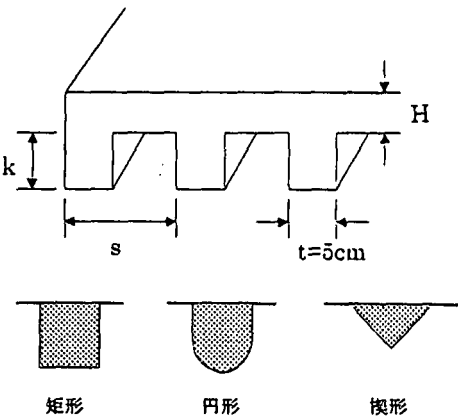
4-1 実験方法

水路 (水路幅 80cm、水深 70cm) に設置したレール上を自走する台車により、木製の模型氷盤を強制的に移動させ、発生した流体力 F_w をロードセルにより測定する (図－2 参照)。

浮体幅は $B=40\text{cm}$ とし、浮体長は $L=30,60,90,120,150,180\text{cm}$ 、移動速度は $V=10 \sim 50\text{cm/sec}$ 、凸部形状は矩形、円形、楔形 (図－3 参照) に変化させ、凸部の高さ k と間隔 S の比は、上田等が実験に於いて、流体力が最大となる事を明らかにした $S/k=7.5$ ($k=2\text{cm}$ 、 $S=15\text{cm}$) で一定とした。



図－2 実験装置



図－3 浮体の凹凸

4-2 結果と考察

単位幅当たり換算した流体力 F_w について、移動速度 V との関係を示す (図-4 参照)。流体力 F_w は、移動速度 V を変数とした 2 次関数により表されるため、最小 2 乗法により近似し、2 次関数の係数 F_w/V^2 を求める。

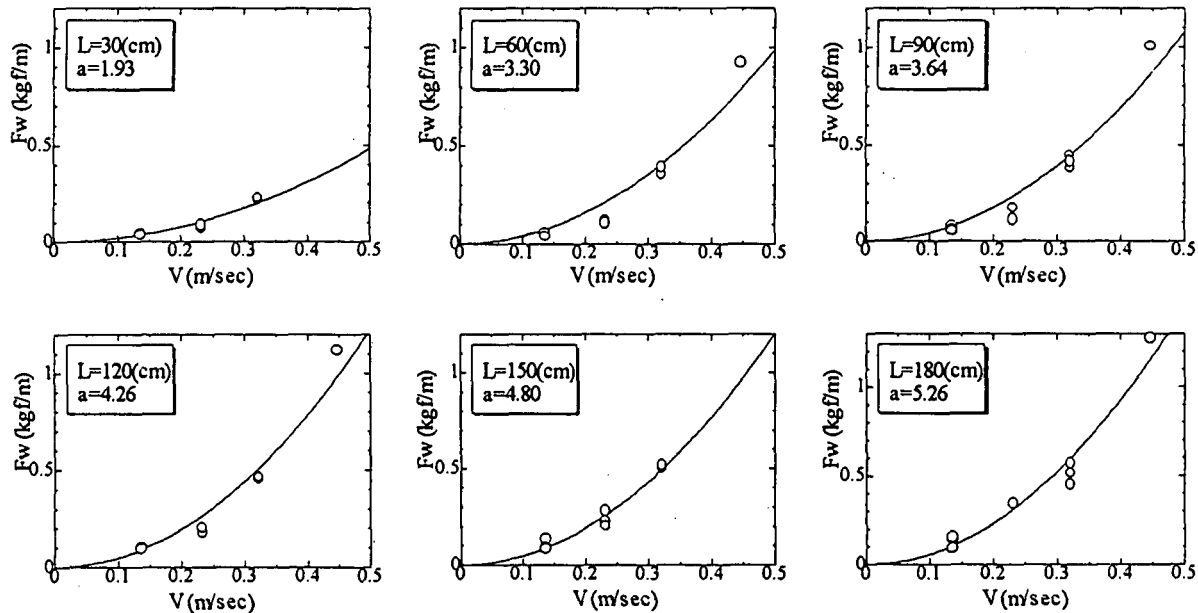


図-4 矩形の凹凸のある浮体に作用する流体力

浮体長 L との関係 (図-5 参照) を示すと、2 次関数の係数 F_w/V^2 は浮体長 L に比例している。

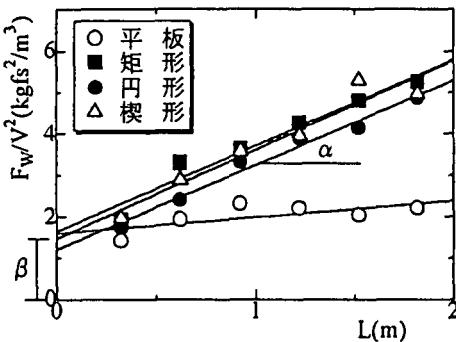


図-5 F_w/V^2 と L の関係

表-2 抵抗係数

	C_{sw}	C_{DW}
平板	7.7×10^{-3}	9.8×10^{-1}
矩形	4.1×10^{-2}	1.0
円形	4.0×10^{-2}	7.3×10^{-1}
楔形	4.2×10^{-2}	9.0×10^{-1}

レイノルズ数の領域は、層流から乱流への遷移領域であり、そのため、実験結果に差異が生じるものと思われる。上田等の実験では、レイノルズ数の範囲は $Re=(kV/\nu)=1,000 \sim 3,500$ であるのに対し、今回の実験では、レイノルズ数の範囲は $Re=(kV/\nu)=2,000 \sim 7,000$ である。

剪断力係数 C_{sw} は、矩形、円形、楔形いずれもほぼ等しく、凸部の高さ k とその間隔 S の比 S/k に最も依存している。形状抵抗係数は、凹凸の形状に最も依存しており、矩形に於いて最も大きく、円形に於いて最も小さい値となっている。

また、流体力 F_w の式より、 F_w/V^2 は次の浮体長 L を変数とする 1 次式により表される。

$$\begin{aligned} F_w/V^2 &= \alpha L + \beta \\ \alpha &= \frac{1}{2} \rho_w C_{sw} \\ \beta &= \frac{1}{2} \rho_w C_{DW} H' \end{aligned}$$

従って、流体力を剪断力の成分と形状抵抗力の成分に分離することが出来、直線の勾配 α 、切片 β より逆算し、剪断力係数 C_{sw} 、形状抵抗係数 C_{DW} を求める。

得られた剪断力係数 C_{sw} 、形状抵抗係数 C_{DW} を表-2 に示す。

平板に対する剪断力係数は、上田等の実験結果とほぼ一致しており、実験条件による差異は無視し得ると思われる。凹凸を付けた模型水盤に対する剪断力係数 C_{sw} 、形状抵抗係数 C_{DW} は、上田等の結果に比べ若干大きい値となった。

得られた剪断力係数とレイノルズ数の関係を図-6 に示す。

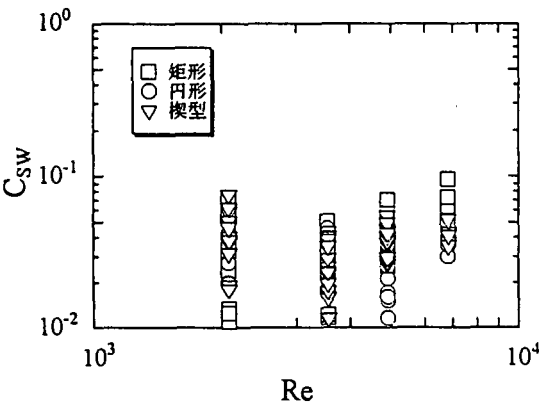


図-6 剪断力係数とレイノルズ数の関係

5.氷盤群の流体抵抗に関する実験

国松等は、アイスブームに作用する氷力を測定し、アイスブームの張力から直接、剪断力係数を求めたが、形状抵抗力の成分を分離していない。今回は、流体力を剪断力の成分と形状抵抗力の成分に分離し剪断力係数を求める。

5-1 実験方法

水路（水路幅 80cm、水深 70cm）に設置したレール上を自走する台車に取り付けた枠の中にポリプロピレン製模型氷盤を入れ、枠を強制的に移動させることによりアイスジャム状態を作り、発生した流体力 F_w をロードセルにより測定する（図-7 参照）。

模型氷盤は、正方形、辺長 $L=5\text{cm}$ 、 10cm を使い、 $L=5\text{cm}, L=10\text{cm}$ での単一氷盤群、面積による混合率 $A=0.5$ での氷盤群に於いてアイスジャム状態とした。アイスジャム長は、 $L=30, 60, 90, 120, 150, 180\text{cm}$ を基準とし実験毎に記録し、移動速度 $V=10\sim 25\text{cm/sec}$ に変化させ実験を行った。

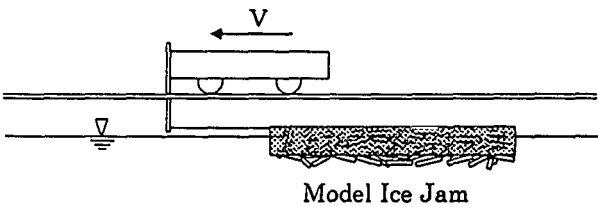


図-7 実験装置

5-2 結果と考察

単位幅当たりに換算した流体力 F_w について、移動速度 V との関係を示す（図-8 参照）。流体力 F_w は、移動速度 V を変数とした 2 次関数により表されるため、最小 2 乗法により近似し、2 次関数の係数 F_w/V^2 を求める。

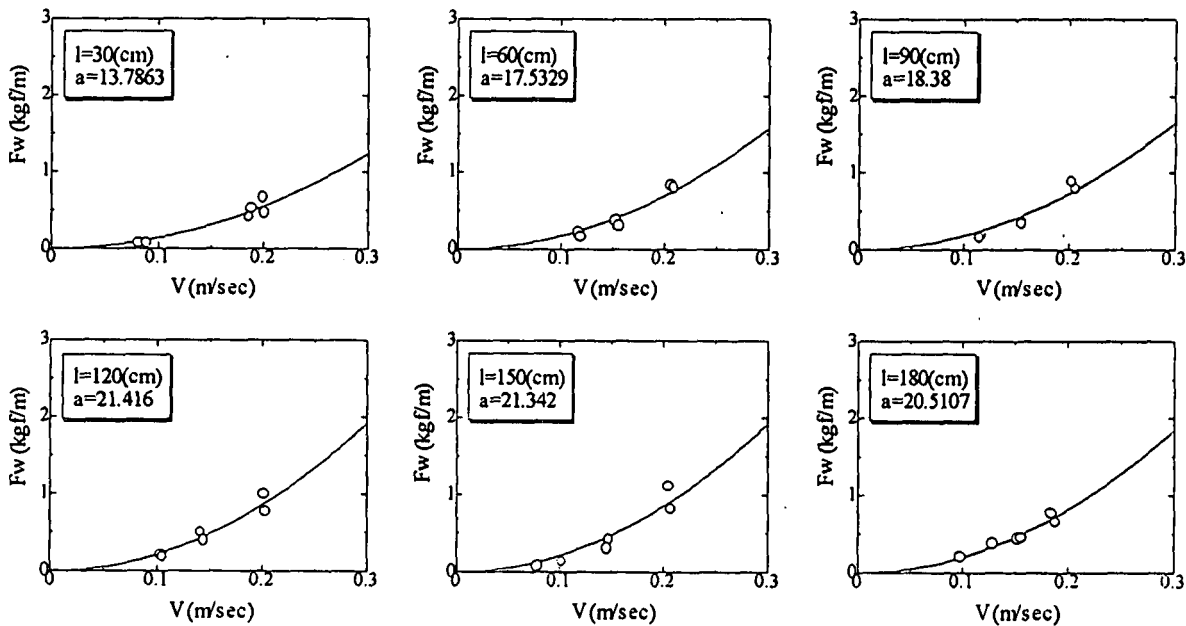


図-8 $L=5\text{cm}$ 単一氷盤群に作用する流体力

浮体長 l との関係（図-9 参照）を示すと、2 次関数の係数 F_w/V^2 は浮体長 l に比例している。

また、流体力 F_w の式より、 F_w/V^2 は次の浮体長 l を変数とする 1 次式により表される。

$$\frac{F_w}{V^2} = \alpha l + \beta \quad \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2} \rho_w C_{SIV} \\ \beta &= \frac{1}{2} \rho_w C_{DW} H' \end{aligned}$$

従って、流体力を剪断力の成分と形状抵抗力の成分に分離することが出来、直線の勾配 α 、切片 β より逆算し、剪断力係数 C_{sw} を求める。

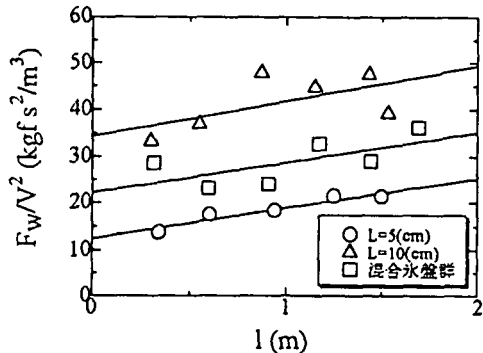


図-9 F_w/V^2 と L の関係

得られた剪断力係数 C_{sw} を表—3 に示す。

表—3 剪断力係数

	C_{sw}
単一氷盤 $L=5\text{cm}$	1.3×10^{-1}
単一氷盤 $L=10\text{cm}$	1.5×10^{-1}
混合率 $A=0.5$	1.3×10^{-1}

剪断力係数 C_{sw} は、単一氷盤 $L=5\text{cm}, 10\text{cm}$ と混合氷盤 $A=0.5$ に於いて、ほぼ一定となった。

アイスジャム状態の氷盤群に対する剪断力係数 C_{sw} は、国松等の結果に比べ若干小さい値となった。これは、流体力から形状抵抗の成分を分離して剪断力を求めたためと思われる。

国松等の実験ではレイノルズ数範囲は $Re=(LV/\nu)=7,000 \sim 15,000$ であるのに対し、今回の実験ではレイノルズ数範囲は $Re=(LV/\nu)=3,000 \sim 16,000$ であり、ほぼ等しいといえる。

6. 流体力の評価

以上の実験により求めた、凹凸の付いた氷盤、及びアイスジャム状態の氷盤群に対する剪断力係数 C_{sw} 、形状抵抗係数 C_{DW} により流体力を算出することが可能であるが、実際には、氷盤の下面形状は複雑であり、また観測は困難である。従って、氷盤群の形状抵抗力を予測することは難しい。

また一般的には、氷盤、氷盤群の被覆面積が増加すると、氷厚に比して氷盤の影響長は非常に大きくなるため、氷盤に作用する流体力は剪断力が卓越し、氷厚と氷盤の影響長の比がある値以上になると形状抵抗力は無視できる。

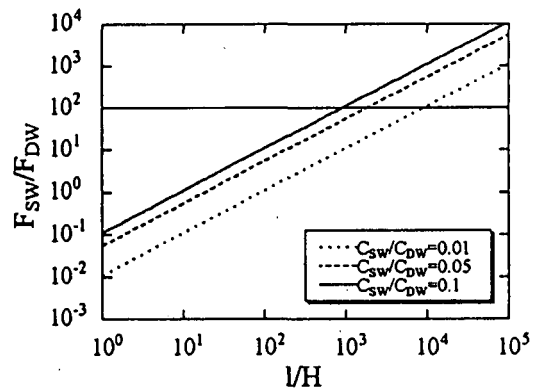
しかし、どの程度で形状抵抗力を無視し得るかということは、まだ確立されていないのが現状である。そこで、種々の条件に於ける流体力の評価を行った。

流れによる単位幅当たりの剪断力と形状抵抗力の比 F_{sw}/F_{DW} は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{F_{sw}}{F_{DW}} &= \frac{LC_{sw}}{(0.9H)C_{DW}} \\ &= 1.11(H/L)(C_{sw}/C_{DW}) \end{aligned}$$

氷盤の影響長 L と氷厚 H の比 L/H と剪断力 F_{sw} と形状抵抗力 F_{DW} の比 F_{sw}/F_{DW} の関係を図—10 に示す。

形状抵抗力 F_{DW} が剪断力 F_{sw} の $1/100$ のオーダーとなる時点で形状抵抗力 F_{DW} を無視することが可能であると仮定した場合、凹凸の付いた氷盤 ($C_{sw}/C_{DW}=0.05$) では、氷盤の影響長 L と氷厚 H の比 L/H に於いて 1,800 程度、アイスジャム状態の氷盤群 ($C_{sw}/C_{DW}=0.3$) では、アイスジャムの影響長 l と氷厚 H の比 l/H に於いて 300 程度以上で形状抵抗力を無視することが可能である。



図—10 氷盤の影響長と氷厚の比と剪断力と形状抵抗力の比の関係

7. サロマ湖湖口部アイスブームに於ける実測値との比較

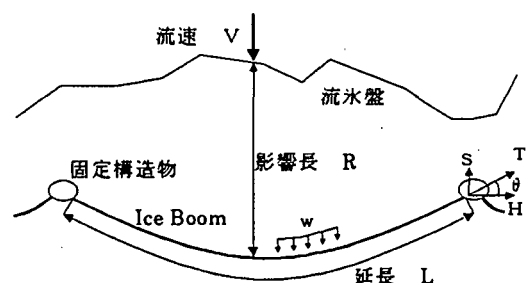
今回の実験により求められた抗力係数を用い流体力を算出し、サロマ湖湖口部アイスブームに於いて測定されたアイスブームの張力と比較する。

アイスブームに作用する氷力は、メインワイヤーの張力とし固定構造物に伝達される構造となっている。メインワイヤーは、作用する氷力を単位長さ当たりの荷重強度 w として受ける。

$$w = F_{sw} = \frac{1}{2} \rho_w C_{sw} V^2 R$$

その作用によりアイスブームは放物線を描き、固定点に於いて、角度 θ に応じた張力 T を発生させる (図—11 参照)。

$$S = wX_0 \quad H = \frac{S}{\tan \theta} \quad T = \sqrt{S^2 + H^2}$$



図—11 アイスブームに発生する張

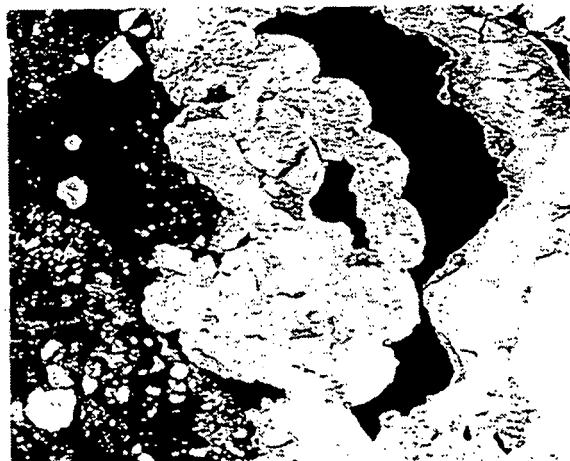


図-12 アイスブームにトラップされた氷盤群

剪断力係数 $C_{sw}=0.13$ に於いては実測値より大きい値、剪断力係数 $C_{sw}=0.011$ に於いては実測値より小さな値となっているが、アイスジャム状氷盤群に対して求めた著者等の値 $C_{sw}=0.13$ が実用的には良い結果を示すことが明らかとなった。

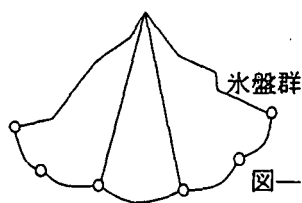


図-13 影響範囲の三角形近似

8. 結論

1. 形状の異なる凹凸を付けた浮体に作用する流体力の剪断力係数、形状抵抗係数を実験より明らかにした。剪断力係数、形状抵抗係数ともに上田等の実験結果に比べ若干大きい値となっている。これは、レイノルズ数の範囲が異なるためと思われる。剪断力係数は、矩形、円形、楔形いずれもほぼ等しく、凸部の高さとその間隔に最も影響される。形状抵抗係数は、凹凸の形状に最も影響される。
2. アイスジャム状態の氷盤群に作用する流体力の剪断抵抗係数を実験より明らかにした。流体力を剪断力と形状抵抗力の成分に分離しているため、国松等の実験結果に比べ若干小さい値となっている。
3. 空気の密度は水の密度に比べ非常に小さく、風による形状抵抗を受けるのは断面積の約 10%に過ぎず風による形状抵抗は無視できる。風による剪断力は、流れによる剪断力の 1/10 のオーダーであり流による剪断力が支配的である。
4. 流れによる剪断力と形状抵抗力に関し、凹凸のある浮体では、氷盤の影響長と氷厚の比 L/H に於いて 1,800 程度、アイスジャム状態では、アイスジャムの影響長とジャム厚の比 L/H に於いて 300 程度以上で形状抵抗は無視できる。
5. 得られた剪断力係数によりサロマ湖湖口部のアイスブームを想定し張力を算出した。実測値より大きな値となったが、影響長を写真のみから判断するため、氷盤の全てはアイスブームに支持されていない可能性がある事が原因であると思われる。

参考文献

1. Mcpee, M., G.: An Analysis of Pack Ice Drift in Summer, Sea Ice Processes and Models, R. S. Prichard. Ed, Washington Univ. Press, pp.62-75
2. 国松靖(1993): アイスブームによる流氷制御に関する研究、北海道大学修士論文、pp.33-38
3. 上田俊也、佐伯浩、山下俊彦、村木義男、榎国夫(1992): 浮氷盤に作用する流体力に関する実験的研究、海洋開発論文集 Vol.8、pp.135-140
4. 網走開発建設部網走港湾建設事務所社団法人寒地港湾技術研究センター: 平成八年度サロマ湖漁港防波堤(防氷)調査検討報告書

観測に於いて影響長は 12:45 から一定となり、流速は時間の経過と共に増加しているが、測定された張力は 13:00 からほぼ一定となっている。これは、影響長を写真(図-12)のみから判断しており、氷盤が有る程度トラップされた時点でアイスブーム固定構造物をベースにアーチを形成し、氷力が固定構造物により支持されている可能性がある事が原因であると思われる。

今回の実験で求められた剪断力係数 $C_{sw}=0.13$ を用いた張力、McPhee の現地観測により求められた剪断力係数 $C_{sw}=0.011$ を用いた張力、アーチを形成していることを考慮し、氷盤の影響範囲を三角形に近似(図-13 参照)した場合に於ける張力を算出し図-14 に示す。

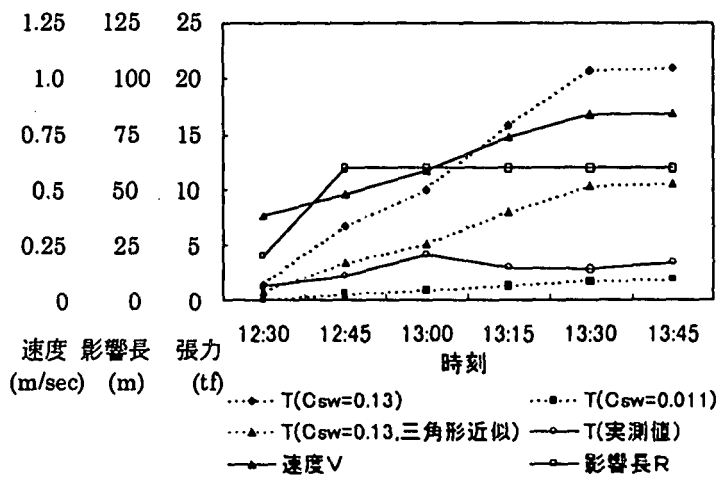


図-14 張力の実測値との比較